Überwachung und Steuerung von Verbrennungsprozessen

von **Frank Hammer**

Ziel der Optimierung von Feuerungsanlagen ist die Kompensation aller auf die Verbrennung wirkenden Störgrößen. Die Überwachung und Steuerung bzw. Regelung von Verbrennungsprozessen basiert heute meist auf der Messung des O_2-Gehalts im Abgas. Mittels moderner Brennersteuerungen mit zusätzlicher integrierter CO/O_2-Regelung können Störeinflüsse noch besser kompensiert werden. Die Feuerung kann dadurch nahe dem Verbrennungsoptimum betrieben werden, was eine höhere Effizienz sowie weniger Abgasverluste und Emissionen zur Folge hat.

Monitoring and optimizing combustion processes

The objective when optimizing combustion systems is to compensate for combustion variables which include air temperature, pressure and humidity and fuel quality; these all affect the combustion process. Modern combustion management systems are based on O_2 measurement in the flue gas. The addition of integrated CO/O_2 control enables systems to more effectively compensate for these combustion variables and increase efficiency.

Industriefeuerungsanlagen müssen heute vor allem effektiv und umweltverträglich sein. Ziel einer jeden Verbrennungsregelung sollte es sein, den Wirkungsgrad zu maximieren und dabei gleichzeitig die Schadstoffe zu minimieren. Zu hohe Luftüberschüsse führen zu Abgaswärmeverlust und Luftmangel hat Wirkungsgradverluste durch unvollständige Verbrennung zur Folge. Idealerweise wird die Anlage kurz vor der sogenannten Emissionskante mit der optimalen Luftzahl (λ_{opt}) betrieben.

Herausforderung für jede Verbrennung sind sich allmählich verändernde Bedingungen sowie schnelle von außen wirkende Störgrößen wie:

- Verbrennungsluft (Temperatur, Druck, Feuchte),
- Brennstoff (Heizwert, Temperatur, Viskosität),
- Verschmutzung (Brenner, Feuerraum, Kessel, Abgaskanal),
- Schornsteinzug (Wind, Temperatur, Barometrischer Luftdruck),
- Mechanik (Spiel, Hysterese, Verschleiß).

Typische Schwankungen der Lufttemperatur von ± 20 °C bewirken O_2-Änderungen von ± 1,5 Vol.-% O_2. **Tabelle 1** zeigt den Einfluss typischer Störgrößen auf den O_2-Gehalt im Feuerungsabgas. Ein fest eingestellter Verbrennungsprozess ohne sensorische Überwachung/Regelung ist diesen O_2-Schwankungen „blind" ausgesetzt. Erhöht sich der O_2-Gehalt, resultiert daraus ein Wirkungsgradverlust durch eine Zunahme der Abgasmenge infolge von Luftüberschuss (**Bild 1**). Bei verringertem O_2-Gehalt, insbesondere bei Sauerstoffmangel, besteht die Gefahr einer unvollständigen Verbrennung mit hohen Schadstoffemissionen wie CO, H_2, C_xH_y, Ruß etc., wenn die sogenannte Emissionskante überschritten wird. Der Wirkungsgrad fällt drastisch ab, da brennbare Gase unverbrannt und ungenutzt über den Kamin ins Freie gelangen.

Eine Überwachung/Regelung und sichere Einstellung der Verbrennung zur Kompensation von Störgrößen ist damit sowohl aus Umwelt- als auch aus Sicherheitsgründen unverzichtbar. Die Regelung des Restsauerstoffgehalts der Feue-

Tabelle 1: Einfluss einiger typischer Störgrößen auf den Sauerstoffgehalt im Feuerungsabgas

Störgröße auf die Verbrennung	Typische Schwankung der Störgröße	O_2-Änderung in Vol.%
Lufttemperatur	± 20 °C	± 1,5
Luftdruck	± 25 mbar	± 0,8
Heizwert	± 10 %	± 2,0

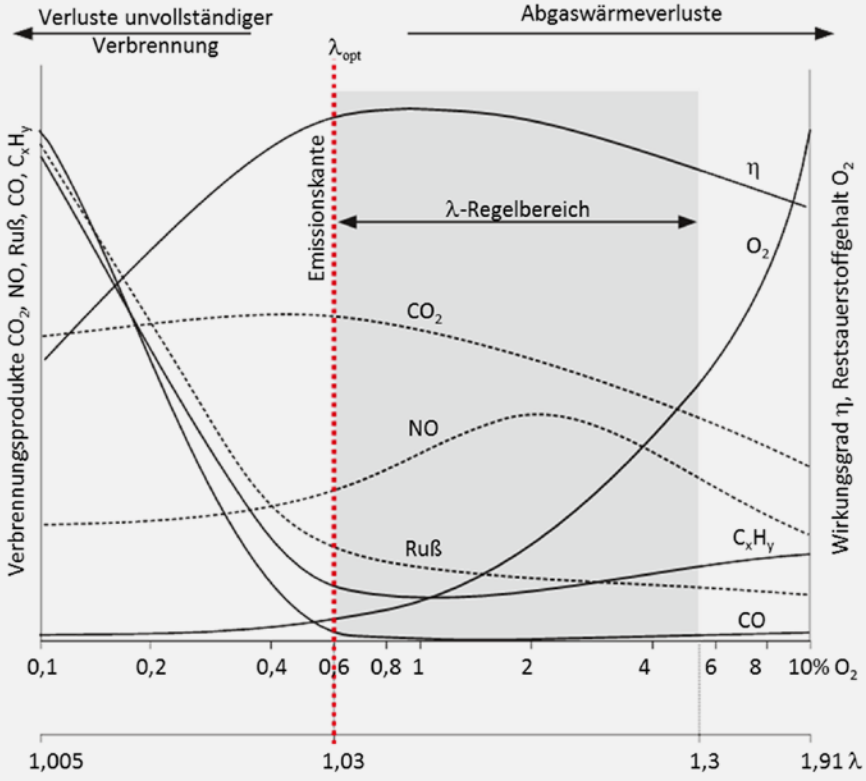

Bild 1: Schadstoffemissionen und Wirkungsgrad in Abhängigkeit vom Luftüberschuss λ

rung gehört schon seit vielen Jahren zum Stand der Technik an Industriefeuerungsanlagen. Eine elektronische Brennstoff/Luft-Verbundregelung bietet hierzu komfortable und kostengünstige Eingriffsmöglichkeiten. Eine O_2-Regelung verschiebt elektronisch die Kurve von Luft und Brennstoff, um so die Feuerung an die auftretenden Störgrößen wie Luft, Brennstoff, Verschmutzung etc. anzupassen.

O_2-REGELUNG

Um der Gefahr einer unvollständigen Verbrennung vorzubeugen, werden heutzutage die meisten Industriefeuerungsanlagen mittels einer klassischen O_2-Regelung auf einen Luftwert λ mit genügend Sicherheitsabstand zur Emissionskante eingestellt. Der Sicherheitsabstand zur Emissionskante muss hierbei umso größer gewählt werden, je größer die Messunsicherheit und der Messfehler z. B. infolge Drift der O_2-Messung oder durch Falschluft sind und je größer und dynamischer die zuvor aufgelisteten Schwankungen sind. Dieser Sicherheitsabstand ist verfahrensbedingt notwendig. Er wirkt sich allerdings ungünstig auf den Wirkungsgrad aus, da Optimierungspotenzial bis zum anlagen- und brennstoffspezifischen Verbrennungsoptimum nahe der Emissionskante verschenkt wird.

Die klassische O_2-Regelung mit lastabhängigen O_2-Sollwerten kompensiert diese Schwankungen weitestgehend. Doch eine Feuerung mit O_2-Regelung holt nicht das maximal Mögliche an Energieeinsparung heraus, da noch immer ein „Sicherheitsabstand" zum feuerungstechnischen Optimum nötig ist. Über die O_2-Regelung hinaus ermöglicht die CO/O_2-Regelung zur Verbrennungsoptimierung – auch bekannt als Emissionskantenregelung – eine weitere Annäherung an die Emissionskante bis hin zum Wirkungsgradmaximum.

CO/O_2-OPTIMIERUNG (EMISSIONSKANTENREGELUNG)

Um die Emissionskante zu finden, wird das Brennstoff/Luft-Verhältnis mittels geeigneter Stellglieder dynamisch und ohne Beeinflussung der Leistungsregelung in Richtung einer kleineren Luftzahl λ verringert, bis an der Emissionskante mittels geeignetem CO_e-Sensor die Produkte unvollständiger Verbrennung CO_e detektiert werden. Dabei bedeutet CO_e die Summe aller brennbaren Bestandteile wie CO, H_2 etc. Ist dieser Betriebspunkt gefunden, werden die Stellglieder wieder geringfügig in Richtung Luftüberschuss verfahren. Der optimale Arbeitspunkt λ_{opt} der Anlage „vor" der Emissionskante mit maximalem Wirkungsgrad ist damit gefunden. Diese Vorgehensweise wird kontinuierlich wiederholt, um auch bei veränderten Bedingungen oder Brennerlasten, die zu einer Verschiebung der Emissionskante führen, stets den Betrieb nahe am Verbrennungsoptimum gewährleisten zu können.

Schnelle Änderungen oder Störungen auf den gefundenen optimalen Arbeitspunkt λ_{opt} werden bei einer CO/O_2-Optimierung durch die permanente Überwachung der CO_e-Emissionen und der Information zum aktuellen O_2-Gehalt im Abgas sowie gegebenenfalls weiterer Plausibilitätsbetrachtungen sofort erkannt. Die Anlage wird dann in einen „sicheren" Betriebsbereich mit minimal erforderlichem Luftüberschuss gebracht und ausgehend von diesem mittels der geschilderten Routine erneut an ihren neuen optimalen Betriebszustand bei den geänderten Konditionen herangeführt. Zudem entfällt bei dieser Lösung auch die Ermittlung und Einstellung des Arbeitspunktes des Brenners der Feuerungsanlage, weil das System den optimalen Betriebspunkt für die Verbrennung eigenständig ermittelt.

Die CO/O_2-Optimierung ist seit über zehn Jahren weltweit erfolgreich im Einsatz. Ihre wichtigsten Vorteile gegenüber einer O_2-Regelung sind:

- Höhere Energieeinsparung durch permanente Selbstoptimierung in jedem Lastpunkt,
- besseres Regelverhalten durch deutlich kürzere Einstellzeit,
- falschluftunabhängig,
- fehlersicher,
- robust,
- wartungsfrei.

Zu dem wichtigen Aspekt der Brennstoffeinsparung kommt noch der Vorteil einer höheren Anlagensicherheit. Veränderungen des Brennstoff/Luft-Verhältnisses werden durch die fortschrittliche Abgassensorik erkannt, und gegebenenfalls korrigiert bzw. die Anlage in einen sicheren Zustand gebracht bzw. abgeschaltet.

VERBRENNUNGS-OPTIMIERUNG

Zur Verbrennungsregelung ist heute das komplette Spektrum an elektronischen Brennersteuergeräten, Flammenüberwachungen, Brennstoff/Luft-Verbundreglern, CO_e/O_2-Messgeräten mit zugehöriger Sensorik am Markt verfügbar. Für Anlagen mittlerer Leistung von 0,3 bis 5 MW ist die Brennersteuerung BurnerTronic BT300 von Lamtec in ihrer Preis-Leistungs-Klasse weltweit das erste Gerät, das sowohl die O_2-Regelung als auch die CO/O_2-Optimierung beinhaltet (**Bild 2**).

State-of-the-art Feuerungs-Management-Systeme vereinigen die Vorteile einer elektronischen Brennstoff/Luft-Verbundregelung mit einem elektronischen Brennersteuergerät. Zusätzlich integriert ist die Dichtheitskontrolle, Flammenüberwachung, Leistungsregler und CO/O_2-Regelung zur Optimierung eines Öl-/Gasgebläsebrenners. Die heutigen Feuerungs-Management-Systeme eignen sich für nahezu alle Feuerungsanlagen. Sicherheitsketten,

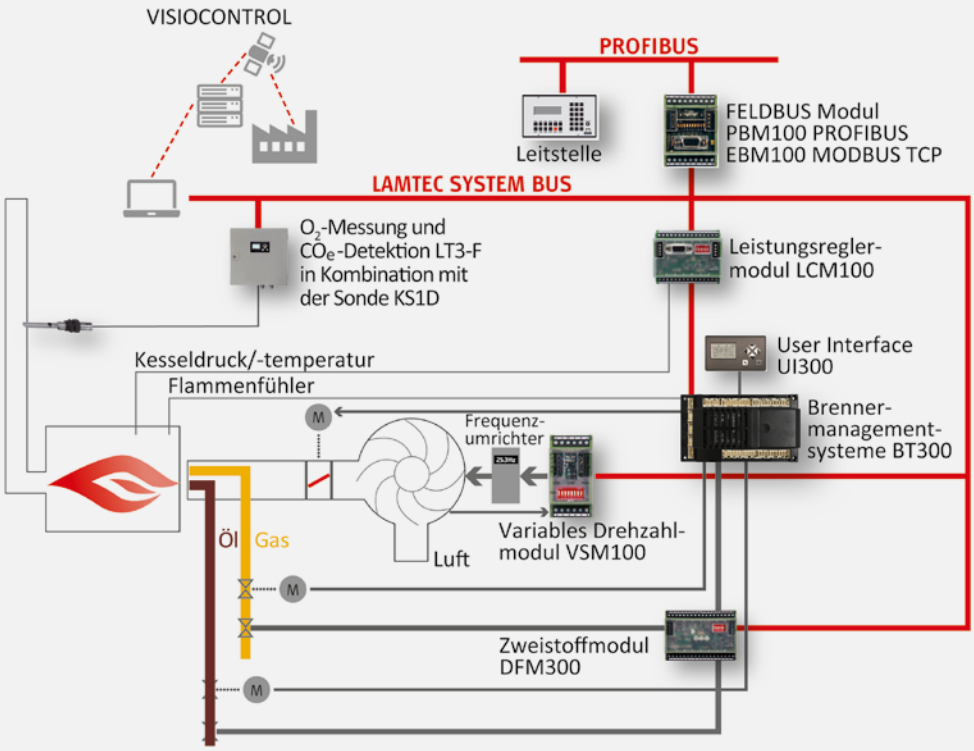

Bild 2: Systemübersicht BurnerTronic BT300 mit integrierter CO/O_2-Optimierung

Bild 3: 5-MW-Zweistoffbrenner mit elektronischem Feuerungs-Management (BT300) CO/O_2-Optimierung und Drehzahlregelung zur optimalen Energieausnutzung

Tabelle 2: Einsparungen bei umgebautem 5-MW-Zweistoffbrenner

Einsparung je Brenner		Schwachlast	Mittellast	Volllast	
Betriebsstunden	h/a	800	800	6.400	
Brennstoffkosten (Annahme)	€/h	46	105	159	
O_2-Reduktion durch O_2-Regelung	Vol.-%	1,28	1,46	1,33	
Einsparung durch O_2-Regelung	€/a	464	1.223	13.598	15.286
zus. O_2-Reduktion durch CO/O_2-Optimierung	Vol.-%	0,33	0,22	0,33	
zus. Einsparung durch CO/O_2-Optimierung	€/a	120	186	3.353	3.660
Einsparung mit Drehzahlregelung	€/a				2.974
Gesamteinsparung	€/a				21.920

Wächter (z. B. Gas-/Luftdruck) und Fühler werden aufgeschaltet. Der Aufwand für zusätzliche Relais und die Verdrahtung reduziert sich dadurch stark.

Die BT300 wurde zum Anbau an den Brenner konzipiert. Die kurzen Verdrahtungswege bringen eine zusätzliche Kosteneinsparung mit sich. Durch die standardisierte Verdrahtung und die einheitliche Bedienerschnittstelle werden Fehlerquellen minimiert. Gezielte Hinweise im Display erleichtern zudem die Fehlersuche.

Feuerungsautomat und Verbundregelung können durch Parametrierung an die unterschiedlichsten Feuerungsaufgaben angepasst werden. Bei der Ausführung BT340 kann der Start mit und ohne Zündbrenner für Öl und Gas getrennt eingestellt werden. Die integrierte Dichtheitskontrolle kann wahlweise vor der Zündung oder nach der Abschaltung des Brenners erfolgen.

Eindeutig und leicht verständliche Symbole vereinfachen die Bedienung. Die eingestellten Verbundkurven können über die optionale CO/O_2-Regelung während des Betriebs optimiert werden. So lassen sich Störeinflüsse kompensieren, die auf die Verbrennung einwirken. Der Brenner wird dadurch immer mit dem höchstmöglichen Wirkungsgrad betrieben.

Bild 3 zeigt einen Kessel einer Thermoprozessanlage für die Nahrungsmittelindustrie mit einem 5-MW-Zweistoffbrenner (Öl/Gas) mit einer CO/O_2-Optimierung und einer lastabhängigen Drehzahlregelung des Verbrennungsluftgebläses zur Energieeinsparung.

In **Tabelle 2** sind die Ergebnisse einer konservativen Einsparrechnung dargestellt. Als Randbedingung gehen typische Schwankungen gemäß Tabelle 1 ein. Die Abgastemperatur bei Volllast lag bei 150 °C und bei Schwachlast bei 120 °C. Die Verbrennungslufttemperatur lag im Sommer bei durchschnittlich 35 °C und im Winter bei 10 °C. Zur Kalkulation der Einsparungen wurden Brennstoffkosten von 0,35 €/kWh_{Gas} und elektrische Energiekosten von 0,12 €/kWh_{el} angesetzt. Die jährlichen Einsparungen durch die O_2-Regelung betragen demnach an jedem Kessel dieser Anlage € 15.286. Der Zusatzgewinn durch die CO/O_2-Optimierung beläuft sich nochmals auf € 3.660. Durch den Einsatz eins drehzahlgeregelten Verbrennungsluftgebläses anstelle eines mit konstanter Drehzahl betriebenen Gebläses mit Klappensteuerung wird zusätzlich elektrische Energie eingespart. Neben dieser Brennstoff- bzw. Kosteneinsparung für den Anlagenbetreiber kommt der Umwelt eine jährliche CO_2-Reduktion von ca. 130 t je Kessel dieser Anlage zugute.

AUTOR

Dr.-Ing. **Frank Hammer**
Lamtec Meß- und Regeltechnik für Feuerungen GmbH & Co. KG
Walldorf
Tel.: 06227 / 6052-75
hammer@lamtec.de

HOTLINE *So erreichen Sie Ihr Verlagsteam*

Chefredaktion:	**Dipl.-Ing. Stephan Schalm**	+49(0)201/82002-12	s.schalm@vulkan-verlag.de
Redaktionsbüro:	**Annamaria Weinert**	+49(0)201/82002-91	a.weinert@vulkan-verlag.de
Redaktion:	**Thomas Schneidewind**	+49(0)201/82002-36	t.schneidewind@vulkan-verlag.de
Redaktion:	**Sabrina Finke**	+49(0)201/82002-15	s.finke@vulkan-verlag.de
Anzeigenverkauf:	**Jutta Zierold**	+49(0)201/82002-22	j.zierold@vulkan-verlag.de
Leserservice:	**Marcus Zepmeisel**	+49(0)931/4170-459	leserservice@vulkan-verlag.de